

引用本文:任志刚,张 铭,魏 巍,等.圆端形钢管混凝土中长柱轴压性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):18-27.

REN Zhi-gang, ZHANG Ming, WEI Wei, et al. Axial Compression Performance of RCFST Middle Long Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 18-27.

DOI:10.19815/j.jace.2019.05054

# 圆端形钢管混凝土中长柱轴压性能

任志刚,张 铭,魏 巍,王丹丹

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**为研究圆端形钢管混凝土中长柱的轴压性能,考虑了构件千分之一杆长的初弯曲,使用有限元软件 ABAQUS 建立了圆端形钢管混凝土中长柱精细化有限元分析模型,利用已有试验数据验证有限元模型的合理性与精确性,在此基础上分析了试件的变形模式和承载能力状态,比较短柱、中长柱与长柱性能的不同,得出了圆端形钢管混凝土界限长细比。综合分析了长细比、钢管厚度、混凝土强度、钢材强度、高宽比等参数,提出了圆端形钢管混凝土中长柱极限承载力简化计算公式,并对简化计算公式的准确性进行了验证。结果表明:短柱为强度破坏,中长柱发生弹塑性失稳破坏,长柱发生弹性失稳破坏;在其他条件相同的情况下,圆端形钢管混凝土中长柱的极限承载力、延性与长细比呈负相关,与钢材强度、钢管厚度呈正相关,混凝土强度的变化对承载力和延性的影响不大;短柱与中长柱界限长细比  $\lambda_0=10\sim 11$ ,中长柱与长柱界限长细比  $\lambda_p=86.4\sim 96.0$ ;与试验数据及有限元计算结果相比,承载力公式具有足够精度,可为圆端形钢管混凝土中长柱研究与工程应用提供理论依据。

**关键词:**圆端形钢管混凝土;轴压性能;界限长细比;承载力;中长柱

**中图分类号:**TU398

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2020)03-0018-10

## Axial Compression Performance of RCFST Middle Long Columns

REN Zhi-gang, ZHANG Ming, WEI Wei, WANG Dan-dan

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the axial compression performance of the round-ended concrete-filled steel tube (RCFST) middle long columns, a finite element model of RCFST middle long columns under axial load was developed by using ABAQUS. On the basis of verifying the rationality and accuracy of the finite element model by the existing experimental data, the deformation and the bearing capacity states of the specimens were analyzed, and the properties of short columns, middle long columns and long columns were compared, the boundary slenderness ratio of RCFST was proposed. A simplified formula for calculating ultimate bearing capacity of RCFST middle long columns was presented based on the analysis of the parameters such as the slenderness ratio, thickness of the steel pipe, concrete strength, steel strength and height to width aspect ratio, and the accuracy of simplified formula was verified. The results show that the short column

收稿日期:2019-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51778512)

作者简介:任志刚(1974-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:whut.ren@163.com。

通信作者:张 铭(1996-),女,山东菏泽人,工学硕士研究生,E-mail:zhangming2107@163.com。

is strength failure, the middle long column is buckling failure and the long column is elastic instability failure. Under the same conditions, the slenderness ratio has negative relation as well the steel strength and thickness of steel pipes have positive relation with the ultimate bearing capacity and ductility of RCFST middle long column under axial load, but the variation of concrete strength has less influence on ultimate bearing capacity and ductility. The bounds slenderness ratio among stub columns, middle long columns and long columns are  $\lambda_0=10-11$  and  $\lambda_p=86.4-96.0$  respectively; the formula for calculating axial load bearing capacity has sufficient accuracy comparing with the results of finite element analysis and experiment, and it can provide theoretical basis for the research and engineering application of RCFST middle long columns.

**Key words:** RCFST; axial compression performance; bounds slenderness ratio; bearing capacity; middle long column

## 0 引言

钢管混凝土具有承载力高、塑性韧性强等优点,性能优良且便于施工,被广泛应用于工程实际中,国内外对圆形、矩形钢管混凝土的研究已经较成熟。圆端形钢管混凝土是一种圆弧形与矩形结合的新型截面形式,抗弯能力强,横向刚度大,稳定性强且具有优良的约束性能,已被广泛应用于桥梁工程中,如武汉市后湖斜拉桥主塔等工程。

文献[1]对圆端形钢管混凝土构件受扭性能进行分析,提出了核心混凝土本构关系等效计算方法,并得出圆端形钢管混凝土受扭极限承载力简化公式;文献[2]~[4]采用有限元软件对圆端形钢管混凝土轴压短柱受力机理进行分析,结果表明圆端形钢管混凝土约束性能、承载力、峰值应变和延性均介于圆形和矩形之间;文献[5]对圆端形钢管混凝土短柱进行轴压试验,提出了圆端形钢管混凝土轴压短柱承载力公式;文献[6],[7]对采用不同构造措施的圆端形钢管混凝土构件进行轴压试验并分析不同构造措施对构件性能的影响,提出了带纵向隔板的圆端形钢管混凝土轴压短柱极限承载力计算公式;文献[8]~[10]对圆端形钢管混凝土构件进行偏压研究,分析偏心率对承载力的影响并进行参数分析;文献[11],[12]对耐候钢管和微膨胀混凝土构件进行试验和有限元分析,比较与普通圆端形钢管混凝土构件的性能差异。目前国内外对圆端形钢管混凝土研究主要集中在短柱,缺少对中长柱的试验研究及理论分析。在工程实际中,多使用大长细比钢管混凝土构件,其破坏形态及受力性能与短柱不同,短柱的规范公式不适用于中长柱,因此有必要对圆端形钢管混凝土中长柱性能进行研究,以完善圆端形钢管混凝土体系,并为工程实际应用提供理论依据。

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立圆端形钢管混凝土模型,分析中长柱和长柱轴压力学性能,并分析主要参数对构件性能的影响,提出了圆端形钢管混凝土中长柱轴压极限承载力计算公式。

## 1 试件设计

图1为圆端形试件截面示意图,其中, $H, B$ 分别为截面的高度与宽度, $t$ 为钢管的厚度。为研究长细比、钢材性能、含钢率、混凝土强度、高宽比对圆端形钢管混凝土中长柱性能的影响,设计了21个试件,试件的长细比范围为10.8~96.0,其中RCFST-al为短柱对照试件,基本参数见表1。

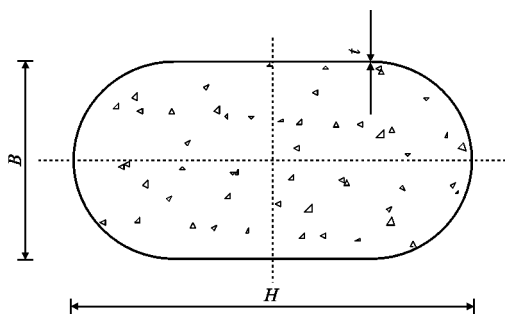


图1 圆端形钢管混凝土截面

Fig. 1 Cross Section of Round-ended Concrete-filled Steel Tube

## 2 有限元模型

### 2.1 材料的本构关系模型

混凝土单轴受压应力-应变关系及相应的参数取值参照文献[13]中方形、矩形钢管核心混凝土本构模型,根据约束效应相等的原则,将圆端形截面视为高、宽分别为 $H, B$ ,转角半径为 $B/2$ 的带转角矩形截面<sup>[8,14]</sup>,具体关系如下

表 1 试件基本参数和极限承载力

Tab. 1 Basic Parameters and Ultimate Bearing Capacities of Specimens

分组依据	试件编号	组号	$H/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$H/B$	$L/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\lambda$	$N_{uc}/\text{kN}$
长细比	RCFST-a1	1	150	100	1.5	450	4.00	235	40	10.8	830.93
	RCFST-a2		150	100	1.5	600	4.00	235	40	14.4	760.37
	RCFST-a3		150	100	1.5	750	4.00	235	40	18.0	748.63
	RCFST-a4		150	100	1.5	900	4.00	235	40	21.6	762.67
	RCFST-a5		150	100	1.5	1 200	4.00	235	40	28.8	720.43
	RCFST-a6		150	100	1.5	1 500	4.00	235	40	36.0	689.83
	RCFST-a7		150	100	1.5	1 800	4.00	235	40	43.2	657.71
	RCFST-a8		150	100	1.5	2 100	4.00	235	40	50.4	636.65
	RCFST-a9		150	100	1.5	3 000	4.00	235	40	72.0	544.92
	RCFST-a10		150	100	1.5	3 600	4.00	235	40	86.4	487.19
	RCFST-a11		150	100	1.5	4 000	4.00	235	40	96.0	424.95
钢管厚度	RCFST-b1	2	150	100	1.5	1 500	6.00	235	40	36.0	852.98
	RCFST-b2		150	100	1.5	1 500	8.00	235	40	36.0	1 040.10
混凝土强度	RCFST-c1	3	150	100	1.5	1 500	4.00	235	30	36.0	624.55
	RCFST-c2		150	100	1.5	1 500	4.00	235	50	36.0	751.90
	RCFST-c3		150	100	1.5	4 000	4.00	235	30	96.0	413.28
	RCFST-c4		150	100	1.5	4 000	4.00	235	50	96.0	448.90
钢材强度	RCFST-d1	4	150	100	1.5	1 500	4.00	345	40	36.0	853.88
	RCFST-d2		150	100	1.5	1 500	4.00	420	40	36.0	982.62
高宽比	RCFST-e1	5	170	85	2.0	1 500	3.79	235	40	33.5	711.47
	RCFST-e2		204	68	3.0	1 500	3.39	235	40	31.9	742.50

注： $L$  为构件设计长度； $f_y$  为钢材屈服强度； $f_{cu}$  为混凝土轴心抗压强度设计值； $\lambda$  为构件长细比； $N_{uc}$  为构件极限承载力。

$$y=\begin{cases} 2x-x^2 & x\leqslant 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta+x} & x>1 \end{cases} \quad (1)$$
$$x=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$
$$y=\frac{\sigma}{\sigma_0}$$
$$\sigma_0=f'_c$$
$$\beta_0=\frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}$$
$$\varepsilon_0=\varepsilon_c+800\xi^{0.2}\times 10^{-6}$$
$$\varepsilon_c=(1\,300+12.5f'_c)\times 10^{-6}$$
$$\eta=1.6+1.5/x$$

式中： $\xi$  为约束效应系数； $\varepsilon, \sigma$  分别为应力和应变； $\varepsilon_0, \sigma_0$  分别为圆形区混凝土峰值应变和峰值应力； $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度。

混凝土单轴受拉应力-应变关系按无约束混凝土考虑,采用图 2 所示的混凝土受拉软化模型,图 2 中  $\sigma_t$  和  $U_1$  分别为混凝土的应力和裂缝宽度,  $U_{10}$  对应的应力为 0,  $G_f$  为断裂能, C20 混凝土的  $G_f$  取为  $40\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , C40 混凝土的  $G_f$  取为  $120\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , 中间插值计算。混凝土开裂应力  $\sigma_{t0}$  按照式(2)进行计

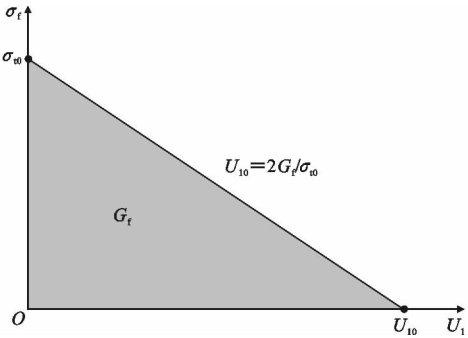


图 2 混凝土受拉软化模型

Fig. 2 Concrete Softening Model Under Tension  
算<sup>[15]</sup>,即

$$\sigma_{t0}=0.26\times(1.25f'_c)^{2/3} \quad (2)$$

钢管的应力-应变关系<sup>[16]</sup>为

$$\sigma_i=\begin{cases} E_y\varepsilon_i & \varepsilon_i\leqslant\varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y<\varepsilon_i\leqslant\varepsilon_{yt} \\ f_y+\zeta E_y(\varepsilon_i-\varepsilon_{yt}) & \varepsilon_{yt}<\varepsilon_i\leqslant\varepsilon_u \\ f_u & \varepsilon_i>\varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\sigma_i$  为钢管的等效应力； $\varepsilon_i$  为钢管的等效应变； $\varepsilon_y$  为钢管的屈服应变； $\varepsilon_{yt}$  为钢管的强化应变,取  $\varepsilon_{yt}=12\varepsilon_y$ ； $\varepsilon_u$  为钢管达极限强度时的应变,取  $\varepsilon_u=120\varepsilon_y$ ； $\zeta$

为系数,取  $\zeta=1/216$ ;  $f_u$  为钢材极限强度,取  $f_u=1.5f_y$ ;取钢管弹性模量  $E_y=2.06\times10^5$  MPa。

2.2 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 进行建模,圆端形钢管混凝土的外包钢管选用 4 节点的壳单元,核心混凝土及加载板采用 8 节点三维实体单元,加载板为刚性面。模型网格划分采用结构化网格划分技术,如图 3 所示。加载板与核心混凝土采取绑定约束(tie)形式;钢管与加载板采用壳与实体耦合;钢管与混凝土采用摩擦型接触,切线方向的接触选取库仑摩擦定义,摩擦因数定为 0.5<sup>[6]</sup>,法线方向定义为“硬接触”,允许钢管与混凝土之间有微小的有限滑移。

柱子采用位移加载的方式,上端截面约束沿 X, Y 方向的位移,施加沿轴向(Z 轴)的竖向位移荷载;下端截面约束沿 X,Y,Z 三个方向的位移。为了模拟试验中刀口铰的边界条件,放松柱子端部屈曲轴方向的转角位移,约束其他 2 个方向的转角位移。中长柱的初始缺陷对构件的力学性能有显著影响,取 L/1 000 的初始偏心距综合考虑<sup>[17]</sup>。

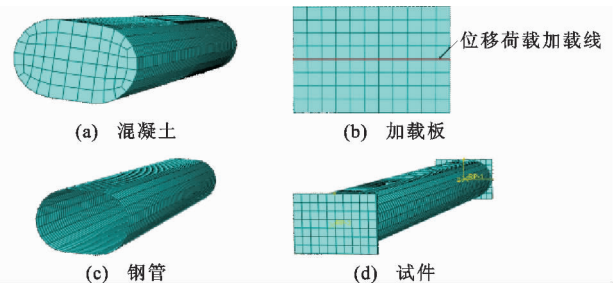


图 3 有限元模型示意图

Fig. 3 Diagram of Finite Element Model

2.3 试验验证

文献[5]对 10 个圆端形钢管混凝土短柱和 4 个圆钢管混凝土短柱进行轴压试验,研究不同高宽比和含钢率对构件极限承载力的影响。文献[6]对圆端形钢管混凝土普通截面和设置单隔板、双隔板、对拉杆等截面进行轴压试验,研究不同构造措施对构

件极限承载力的影响,构件长细比为 11~14。文献[18]对 2 个圆弧段圆心角为 120°的圆端形钢管混凝土构件进行轴压试验,对构件的受力机理进行了分析,构件长细比为 17.4。现将文献[5],[6]和文献[18]中圆端形钢管混凝土构件轴压试验数据与有限元模拟进行对比,结果见表 2 和图 4,其中  $N_{u0}$  为试验构件极限承载力,  $N'_u$  为极限承载力有限元模拟结果。各构件试验曲线与有限元计算曲线基本吻合,则说明采用上述有限元模型对圆端形钢管混凝土中长柱轴压性能分析是合理的。

3 ABAQUS 结果分析

3.1 破坏模式

图 5~7 给出了典型试件各部分的应力云图。图 5 为典型短柱试件 RCFST-a1 在不同加载阶段时的钢管 Mises 应力和混凝土纵向应力云图,取承载力  $P$  上升至 30%  $P_{max}$ , 85%  $P_{max}$ ,  $P_{max}$  以及下降至 75%  $P_{max}$  四个受力阶段,其中  $P_{max}$  为极限承载力;图 8(a)为 RCFST-a1 的荷载-位移曲线。由图 8(a)可知:在加载初期试件应力呈均匀分布,各处应力均很小,应力、应变为线性关系;随着荷载的增加,发生应力重分布,当荷载增大到 85%  $P_{max}$  时,钢管开始屈服,试件中部应力明显增大,出现鼓曲。达到最大承载力时,柱子高度降低。随后混凝土出现裂缝而逐渐退出工作,试件承载力下降,至 85%  $P_{max}$  时趋于平缓,说明短柱有较好的稳定性和延性。

图 6 为典型中长柱试件 RCFST-a6 各部分应力云图,图 8(b)为 RCFST-a6 的荷载-位移曲线。由图 8(b)可知,加载初期初始缺陷对中长柱的影响较小,柱子受力情况同短柱试件 RCFST-a1,荷载达到 85%  $P_{max}$  时,试件发生偏心受力,开始产生侧移,钢管受力增大至极限强度后开始屈服,试件应力-应变曲线出现非线性变化,试件刚度减小,发生弹塑性失稳。

表 2 试验数据与有限元计算数据对比

Tab. 2 Comparison of Test Data and Finite Element Calculation Data

数据来源	试件编号	$H/mm$	$B/mm$	$t/mm$	$L/mm$	$f_{cu}/MPa$	$f_y/MPa$	$N_{u0}/kN$	$N'_u/kN$	$N_{u0}/N'_u$
文献[5]	CFRT1-A	299.8	252.6	3.75	750.0	40.40	327.7	3 429.00	3 572.74	0.96
	CFRT3-A	350.0	255.1	3.72	900.0	40.40	327.7	3 929.00	4 007.97	0.98
	CFRT5-A	394.1	260.0	3.79	1 000.0	50.40	327.7	5 620.00	5 774.33	0.97
文献[6]	RCFST-4	237.5	156.5	2.86	719.6	38.06	324.6	1 544.80	1 544.80	1.06
	RCFST-5	317.0	158.5	2.86	962.3	38.06	324.6	2 161.50	2 139.89	0.99
文献[18]	A 试件	158.5	317.0	2.86	962.3	34.80	210.0	2 284.87	2 302.02	1.01
	B 试件	158.5	317.0	2.86	962.3	34.80	210.0	2 107.85	2 302.02	1.09

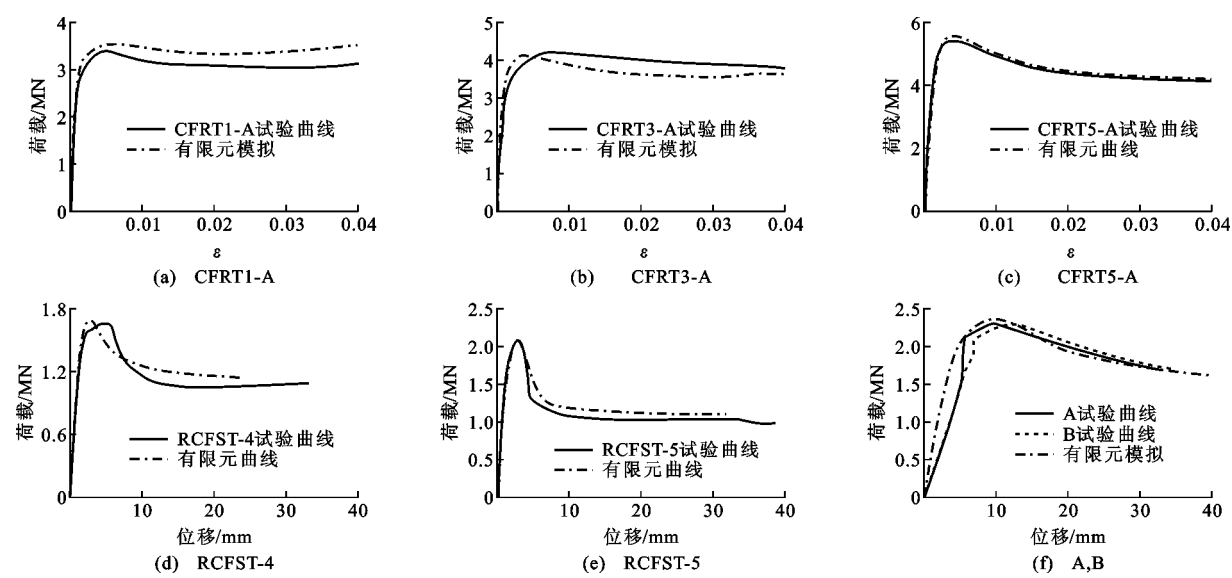


图 4 试件荷载-轴向应变(位移)关系曲线

Fig. 4 Load-axial Strain (Displacement) Curves of Specimens

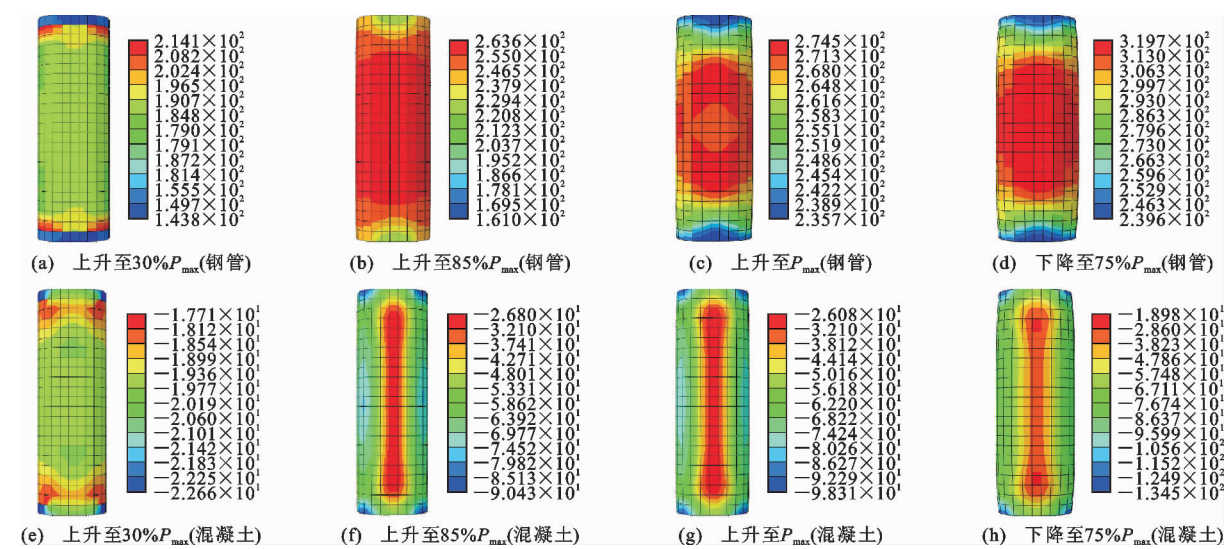


图 5 典型短柱试件 RCFST-a1 各部分应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress Nephogram of Each Part of Typical Stub Column RCFST-a1 (Unit: MPa)

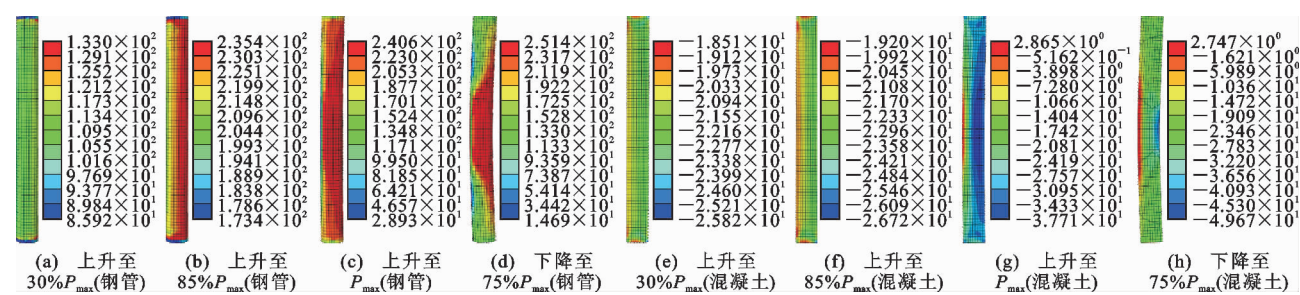


图 6 典型中长柱试件 RCFST-a6 各部分应力云图(单位:MPa)

Fig. 6 Stress Nephogram of Each Part of Typical Middle Long Column RCFST-a6 (Unit: MPa)

图 7 为典型长柱试件 RCFST-a11 各部分应力云图;图 8(c)为 RCFST-a11 的荷载-位移曲线。由图 8(c)可知,在初始缺陷的作用下加载初期钢管已产生侧向位移,试件达到极限承载力时混凝土无明显裂缝,长柱中混凝土只起到支撑钢管的作用,试件承载力低,稳定性差。



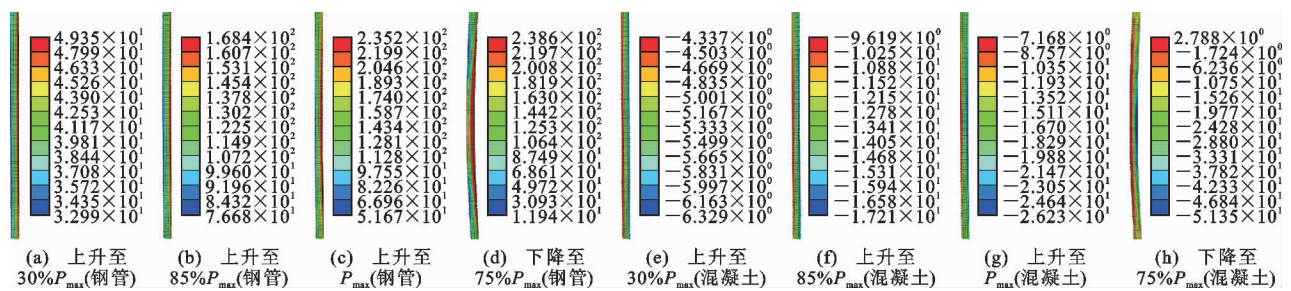


图 7 典型长柱试件 RCFST-a11 各部分应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Stress Nephogram of Each Part of Typical Long Column RCFST-a11(Unit:MPa)

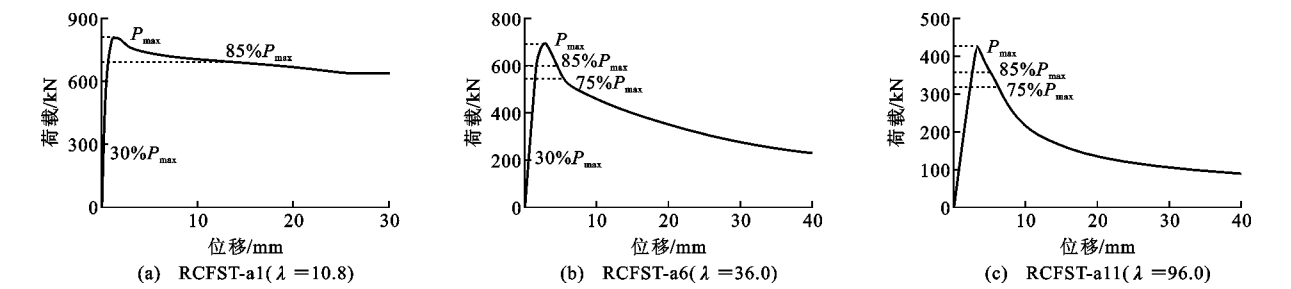


图 8 各典型试件荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement Curves of Typical Components

### 3.2 荷载与钢管应变的关系

图 9,10 为试件荷载-钢管应变( $P-\epsilon$ )曲线,其中,正应变表示受拉,负应变表示受压。

长细比 $\lambda=36.0$ 的试件轴压荷载下混凝土微裂缝扩大,塑性变形发展,环向应变明显增长;达到峰

值荷载时全截面受压,随着位移荷载的增大,部分截面由受压转为受拉后退出工作,试件承载力下降,为典型中长柱的弹塑性破坏模式,见图 9。

长细比 $\lambda=96.0$ 的试件初始缺陷使试件发生屈曲,受力状态与压弯试件相似,在弹性阶段,轴压荷

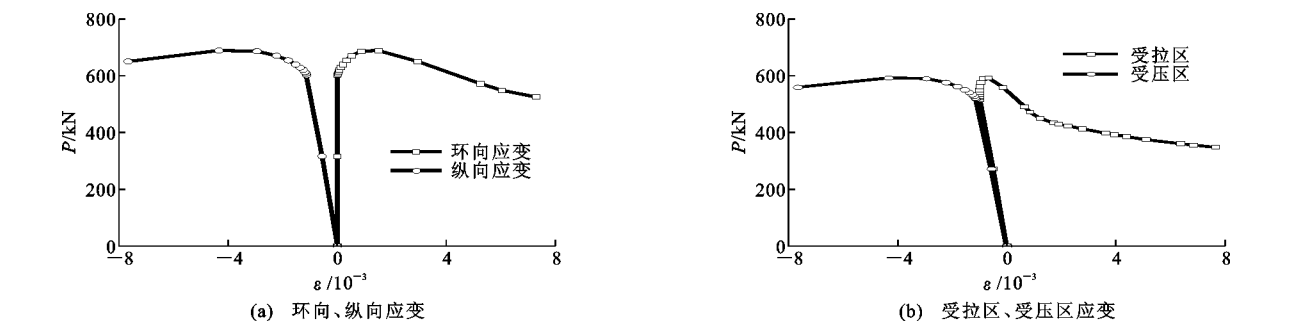


图 9  $\lambda=36.0$  的中长柱  $P-\epsilon$  关系曲线

Fig. 9  $P-\epsilon$  Relationship Curves of Middle Long Column with  $\lambda=36.0$

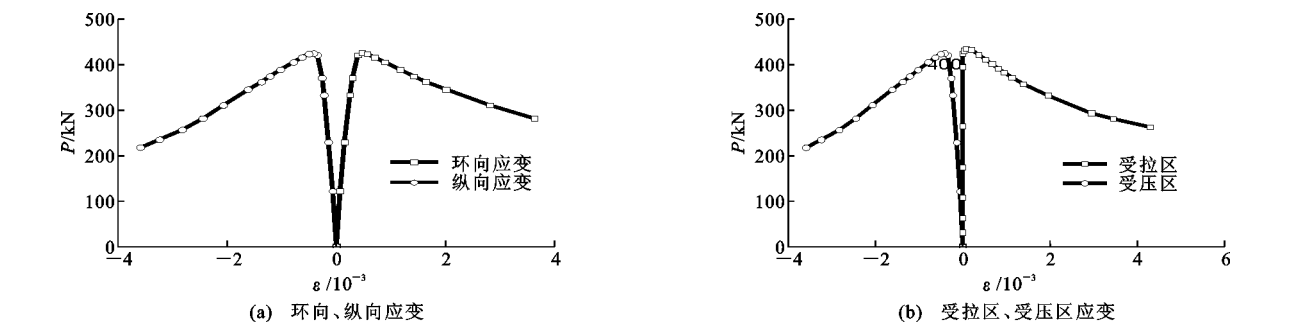


图 10  $\lambda=96.0$  的长柱  $P-\epsilon$  关系曲线

Fig. 10  $P-\epsilon$  Relationship Curves of Long Column with  $\lambda=96.0$

载下混凝土的初始弹性基本不变,环向应变增长较小,峰值荷载时受拉区截面由受压转为受拉。继续加载试件发生整体屈曲,为典型长柱试件的弹性破坏模式,见图 10。

对不同长细比试件的  $P-\epsilon$  关系曲线进行分析,判断试件的破坏模式,结果见表 3。由图 3 可知,中长柱与长柱界限长细比  $\lambda_p=86.4\sim 96.0$ 。

4 参数分析

图 11 为不同参数变化下的试件荷载-位移曲线对比。由图 11 可知:随着长细比增大,试件极限承载力、初始刚度、延性均降低;混凝土强度变化对试件极限承载力、初始刚度、延性影响均较小;钢材强度提高,试件极限承载力增大,延性增加,初始刚度

变化不大;钢管厚度增大,试件极限承载力和初始刚度有所提高,延性增强;高宽比增大,圆端形钢管混凝土试件极限承载力有所提高,初始刚度影响不大。

5 承载力极限公式

图 12 为钢管混凝土的稳定系数-长细比( $\varphi-\lambda$ )关系曲线<sup>[13]</sup>其中, $\lambda_0$  为短柱和中长柱的界限长细比。 $\lambda_0$  可按式(4)确定

$$\lambda_0=\begin{cases} \pi\sqrt{(420\xi+550)/[(1.02\xi+1.14)f_{ck}]} & \text{圆形} \\ \pi\sqrt{(220\xi+450)/[(0.85\xi+1.18)f_{ck}]} & \text{方形} \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi=\frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}=\alpha \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (5)$$

式中: $A_s$  为钢材截面面积; $A_c$  为混凝土截面面积; $\alpha$

表 3 不同长细比试件的破坏模式

Tab. 3 Failure Modes of Components with Different Slenderness Ratios

$\lambda$	10.8	14.4	18.0	19.2	21.6	28.8	30.0	36.0	43.2	50.4	72.0	86.4	96.0	122.4
破坏模式	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	INB	EB	EB

注:INB 代表弹塑性破坏模式;EB 代表弹性屈曲破坏模式。

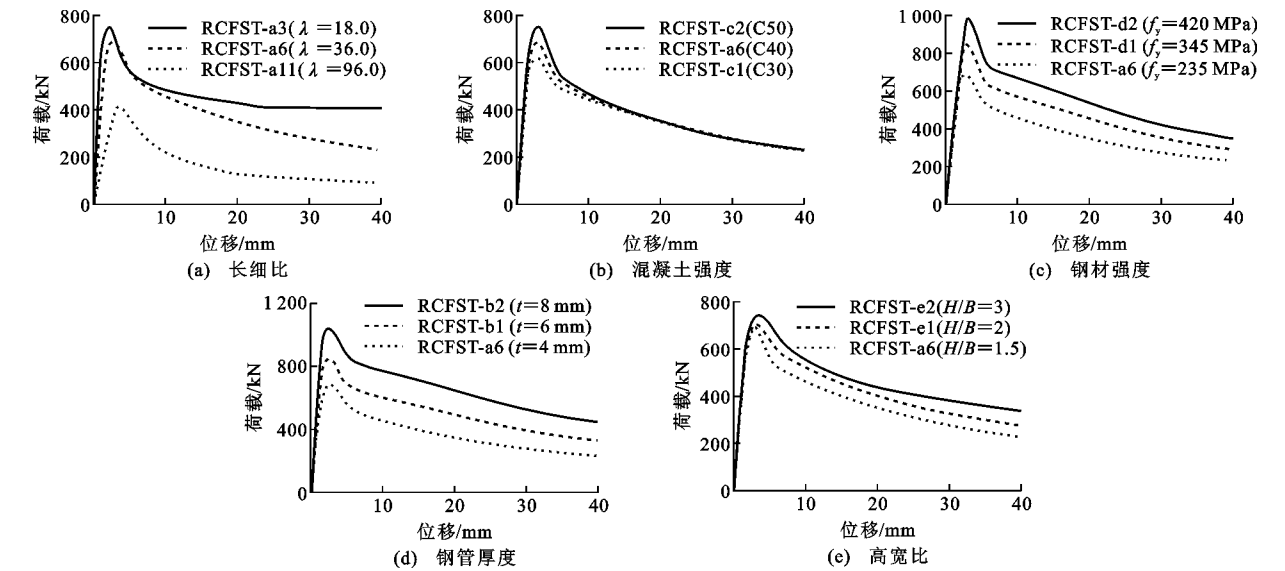


图 11 不同参数变化对荷载-位移曲线的影响

Fig. 11 Influence of Parameter Variation on Load-displacement Curves

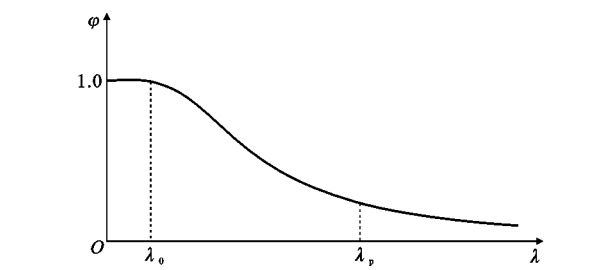


图 12 典型  $\varphi-\lambda$  关系曲线

Fig. 12 Typical  $\varphi-\lambda$  Relation Curve

为圆钢管截面含钢率; $f_{ck}$ 为混凝土轴心抗压强度标准值。

圆端形钢管混凝土中长柱轴压极限承载力  $N_{u,cr}$  为

$$N_{u,cr}=\varphi N_u=\varphi A_{sc} f_{scy} \quad (6)$$

$$N_u=A_c f_{ck}[1+(0.8+0.9B/H)\xi] \quad (7)$$

式中: $N_u$  为圆端形钢管混凝土短柱轴压极限承载力,其计算公式取自参考文献[5]; $A_{sc}$ 为钢管混凝土柱截面面积; $f_{scy}$ 为钢管混凝土柱轴压强度。

现将文献[5]和文献[6]中圆端形轴压短柱试验结果与公式(7)计算结果进行对比,见表 4。结果表明,公式(7)可以准确计算圆端形钢管混凝土短柱极限承载力。

钢材屈服强度是影响稳定系数的主要因素<sup>[19-21]</sup>。表 5 为不同钢材标号下试件的承载力,表 6 为试件的稳定系数  $\varphi$ , $\varphi=1$  时取界限长细比  $\lambda_0$ 。

由表 6 可知,当  $\lambda=10\sim 11$  时,对应的  $\varphi$  值近似为 1,取  $\lambda_0=10\sim 11$ 。对比可知,该结果与方形钢管混凝土界限长细比公式计算结果较接近,故方钢管混凝土界限长细比公式适用于圆端形钢管混凝土。

稳定系数  $\varphi$  与长细比  $\lambda$  的关系式<sup>[13]</sup> 为

$$\varphi=\begin{cases} 1 & \lambda\leqslant\lambda_0 \\ a\lambda^2+b\lambda+c & \lambda_0<\lambda\leqslant\lambda_p \\ \frac{d}{(\lambda+35)^2} & \lambda>\lambda_p \end{cases} \quad (8)$$

$$a=\frac{1+(35+2\lambda_p-\lambda_0)e}{(\lambda_p-\lambda_0)^2} \quad (9)$$

$$b=e-2a\lambda_p \quad (10)$$

$$c=1-a\lambda_0^2-b\lambda_0 \quad (11)$$

$$e=\frac{-d}{(\lambda_p+35)^3} \quad (12)$$

(1)对于圆钢管混凝土

$$d=[13\ 000+4\ 657\ln(\frac{235}{f_y})]\cdot$$

$$(\frac{25}{f_{ck}+5})^{0.3}(\frac{\alpha}{0.1})^{0.05} \quad (13)$$

(2)对于方形、矩形钢管混凝土

$$d=[13\ 500+4\ 810\ln(\frac{235}{f_y})]\cdot$$

$$(\frac{25}{f_{ck}+5})^{0.3}(\frac{\alpha}{0.1})^{0.05} \quad (14)$$

通过对 96 个有限元模拟结果进行回归分析,修正公式(13),(14)得圆端形钢管混凝土系数  $d$  计算公式为

$$d=[12\ 556+4\ 845\ln(\frac{235}{f_y})]\cdot$$

$$(\frac{25}{f_{ck}+5})^{0.3}(\frac{\alpha}{0.1})^{0.05} \quad (15)$$

式(15)的判定系数  $R^2=0.950\ 73$ 。

图 13 为表 1 各试件有限元计算稳定系数与按公式(8)计算稳定系数的比值与长细比的关系图,其中  $\varphi_{fe}$  为稳定系数有限元结果, $\varphi_{eq}$  为稳定系数公式计算值。由图 13 可以看出,除个别试件较离散,2 种方法计算所得稳定系数相差不大,相对误差控制在  $\pm 10\%$  之内。

选取文献[6]和文献[18]中 6 个圆端形钢管混凝土试件,长细比在  $10\sim 18$  之间。将公式(6)~(15)计算所得极限承载力与试验结果进行对比,结果见表 7。由表 7 可见, $N_{ue}/N_{uc}$  的均值为 1.04,公

表 4 极限承载力公式计算结果与试验结果对比

Tab. 4 Comparison Between Formula Calculation Results and Test Results of Ultimate Bearing Capacity

试件编号	$H/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{ck}/\text{MPa}$	$N_{ue}/\text{kN}$	$N_{uc}/\text{kN}$	$N_{ue}/N_{uc}$
CFRT1-A <sup>[5]</sup>	299.8	252.6	3.75	750.0	327.7	27.1	3 220.19	3 429	0.939
RCFST-1 <sup>[6]</sup>	168.5	117.0	2.86	540.0	324.6	25.5	1 004.75	925	1.090
RCFST-2 <sup>[6]</sup>	229.0	118.0	2.86	721.9	324.6	25.5	1 255.13	1 215	1.033
RCFST-4 <sup>[6]</sup>	237.5	156.5	2.86	719.6	324.6	25.5	1 600.49	1 658	0.965

注: $N_{ue}$ 为极限承载力公式计算结果; $N_{uc}$ 为极限承载力试验结果。

表 5 不同钢材标号下试件承载力

Tab. 5 Bearing Capacity of Different Steel Grades

$\lambda$	10.08	10.80	14.40	18.00	28.80	36.00	43.20	50.40	72.00	96.00	$N_u/\text{kN}$
Q235	867.18	830.93	760.37	748.63	720.43	689.83	657.71	636.65	544.92	424.95	829.93
Q345	1 095.90	1 005.50	930.48	913.55	897.35	853.88	841.36	836.41	807.33	680.58	1 077.31
Q420	1 289.60	1 130.50	1 086.60	1 021.30	996.30	982.62	930.21	917.60	880.79	793.21	1 245.98

表 6 稳定系数  $\varphi$  值

Tab. 6 Stable Coefficient  $\varphi$

$\lambda$	10.08	10.80	14.40	18.00	28.80	36.00	43.20	50.40	72.00	96.00	$\lambda_0$	$\lambda^B$	$\lambda^C$
Q235	1.040	1.001	0.916	0.902	0.868	0.831	0.792	0.767	0.657	0.512	10.800	10.910	12.800
Q345	1.02	0.93	0.86	0.85	0.83	0.79	0.78	0.78	0.75	0.63	10.50	10.71	12.71
Q420	1.04	0.91	0.87	0.82	0.80	0.79	0.75	0.74	0.71	0.64	10.30	10.61	12.66

注:由于公式(7)较保守,短柱出现了  $\varphi$  值大于 1 的情况; $\lambda^B$  为按公式(4)中方钢管截面计算所得界限长细比; $\lambda^C$  为按公式(4)中圆钢管截面计算所得界限长细比。



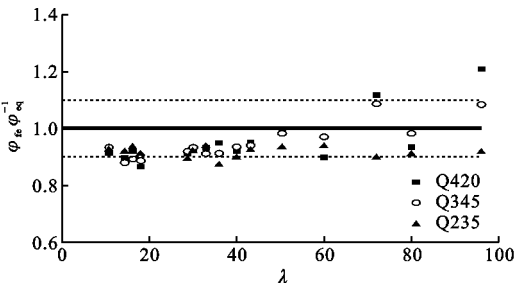


图 13  $\varphi_{fe}/\varphi_{eq}$  与长细比  $\lambda$  的关系

Fig. 13 Relation Between  $\varphi_{fe}/\varphi_{eq}$  and Slenderness Ratio  $\lambda$

表 7 试验数据及公式计算结果对比

Tab. 7 Comparison Between Experimental Date and Calculated Results by Formula

数据来源	试件编号	$B/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$\lambda$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$N_{uc}/\text{kN}$	$N_{ue}/\text{kN}$	$N_{ue}/N_{uc}$
文献[6]	RCFST-1	117.0	168.5	2.86	540.0	11.51	38.06	324.6	1 001.89	925.0	1.08
	RCFST-2	118.0	229.0	2.86	721.9	11.88	38.06	324.6	1 248.97	1 215.0	1.03
	RCFST-3	116.5	349.5	2.86	1 080.0	13.39	38.06	324.6	1 721.24	1 635.0	1.05
	RCFST-4	156.5	237.5	2.86	719.6	10.92	38.06	324.6	1 601.20	1 544.8	1.04
	RCFST-5	158.5	317.0	2.86	962.3	11.53	38.06	324.6	2 014.28	2 161.5	0.93
文献[18]	试件 1	240.0	385.0	4.00	1 850.0	17.43	34.80	210.0	2 840.44	2 505.6	1.13

失稳破坏,达到极限承载力时环向应变开始发展,受拉区截面由受压转为受拉,部分截面退出工作。

(2)分析中长柱与长柱的破坏模式、应力-应变关系曲线得出不同长细比构件的破坏模式,可知中长柱与长柱的界限长细比 $\lambda_p=86.4\sim96.0$ 。

(3)圆端形钢管混凝土中长柱的极限承载力与长细比呈负相关,与钢材强度、钢管厚度呈正相关,混凝土强度的变化对承载力的影响不大。

(4)通过分析长细比与稳定系数的关系可知短柱与中长柱的界限长细比 $\lambda_0=10\sim11$ ,该结果与方形、矩形钢管混凝土柱界限长细比公式较吻合,故方形、矩形钢管混凝土柱界限长细比公式适用于圆端形钢管混凝土。

(5)提出了圆端形钢管混凝土长柱轴压极限承载力简化计算公式,并验证了公式的准确性。该成果可为圆端形钢管混凝土长柱构件轴压与偏压设计提供参考依据,并为工程实际应用提供理论指导。

参考文献:

References:

[1] 王静峰,於忠华,沈奇罕,等.圆端形椭圆钢管混凝土受扭性能数值分析及抗扭承载力计算[J].建筑科学与工程学报,2018,35(3):7-15.  
WANG Jing-feng, YU Zhong-hua, SHEN Qi-han, et al. Torsional Behavior Numerical Analysis and Torsion Bearing Capacity Calculation of Circular-end Elliptical Concrete-filled Steel Tube[J]. Journal of

式相对误差控制在 $\pm 10\%$ 之内。因此,圆端形钢管混凝土中长柱轴压极限承载力简化公式计算结果较为精确。

6 结 语

(1)长细比是影响圆端形钢管混凝土形态的主要因素。短柱发生屈曲破坏;中长柱发生弹塑性失稳破坏,未达到极限承载力时环向应变已有较大发展,达到极限承载力时全截面受压;长柱发生弹性

Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 7-15.  
[2] 谢恩普,王志滨,林 盛,等.圆端形钢管混凝土轴压短柱的机理分析[J].福州大学学报:自然科学版,2015,43(4):517-522.  
XIE En-pu, WANG Zhi-bin, LIN Sheng, et al. Mechanism Analysis on Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2015, 43(4): 517-522.  
[3] WANG J F, SHEN Q H. Numerical Analysis and Design of Thin-walled RECFST Stub Columns Under Axial Compression[J]. Thin-walled Structures, 2018, 129: 166-182.  
[4] HASSANEIN M F, PATEL V I. Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Short Columns: FE Investigation Under Axial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 222-236.  
[5] 谷利雄,丁发兴,付 磊,等.圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J].中国公路学报,2014,27(1): 57-63.  
GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.  
[6] 王志滨,陈 靖,谢恩普,等.圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J].建筑结构学报,2014,35(7):123-

- 130.
- WANG Zhi-bin, CHEN Jing, XIE En-pu, et al. Behavior of Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 123-130.
- [7] 付磊, 丁发兴, 谷利雄, 等. 圆端形钢管内约束混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(11): 113-120.
- FU Lei, DING Fa-xing, GU Li-xiong, et al. Mechanical Properties of Stirrups Confinement Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Short Columns Under Axial Compression [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 113-120.
- [8] 李德山, 池思源, 王志滨. 圆端形钢管混凝土柱偏压力学性能研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2016, 44(4): 538-542.
- LI De-shan, CHI Si-yuan, WANG Zhi-bin. Mechanical Behavior of Round-end Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Load [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2016, 44(4): 538-542.
- [9] 李锦华, 王二磊. 圆端形钢管混凝土偏压构件受力性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(4): 50-53.
- LI Jin-hua, WANG Er-lei. Mechanical Behavior of Round-ended Steel Tube Under Eccentric Load [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(4): 50-53.
- [10] 王二磊. 圆端形钢管混凝土受压力学性能与可靠度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- WANG Er-lei. Research on Compressive Behavior and Reliability of Round-ended Steel Tube-Filled Concrete Column [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [11] 丁发兴, 傅强, 方常靖. 圆端形耐候钢管混凝土轴压短柱力学性能研究[J]. 铁道工程学报, 2017(11): 33-38.
- DING Fa-xing, FU Qiang, FANG Chang-jing. Research on the Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Weathering Steel Tubular Stub Columns under Axially Compressive Loading [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(11): 33-38.
- [12] 易贤仁, 李彬, 卢哲安, 等. 圆端形钢管微膨胀混凝土塔柱非线性接触分析[J]. 混凝土, 2010(1): 33-36.
- YI Xian-ren, LI Bin, LU Zhe-an, et al. Nonlinear Contact Analysis on Round-ended Micro-expansive Concrete Filled Steel Tubes Tower-column [J]. Concrete, 2010(1): 33-36.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
- HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of Concrete-filled Thin-walled Steel Tubes Under Pure Torsion [J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [15] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- SHEN Ju-min, WANG Chuan-zhi, JIANG Jian-jing. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete and Limit Analysis of Plate and Shell [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [16] DING F, YING X, ZHOU L, et al. Unified Calculation Method and Its Application in Determining the Uniaxial Mechanical Properties of Concrete [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(3): 381-393.
- [17] GB 50017—2017, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2017, Standard for Design of Steel Structures [S].
- [18] 马小春. 圆端形钢管混凝土轴压试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- MA Xiao-chun. Research on Axial Compression Test About Concrete Filled Steel Tube of Round Tip Shape [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [19] QIU W, MCCANN F, ESPINOS A, et al. Numerical Analysis and Design of Slender Concrete-filled Elliptical Hollow Section Columns and Beam-columns [J]. Engineering Structures, 2017, 131: 90-100.
- [20] HASHEM Z A, YUAN R L, SHORT V S. Long Column Behavior of Pultruded Glass-fiber Reinforced Polymer Composites [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(8): 369-378.
- [21] UY B, TAO Z, HAN L H. Behaviour of Short and Slender Concrete-filled Stainless Steel Tubular Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 360-378.